

Wärmeübertragungsprobleme bei Belagbildung in verfahrenstechnischen Apparaten

Bohnet, Matthias

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1988 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.155-173



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Wärmeübertragungsprobleme bei Belagbildung in verfahrenstechnischen Apparaten

Von **Matthias Bohnet**, Technische Universität Braunschweig

Die Verfahrenstechnik befaßt sich als Ingenieursdisziplin mit der Stoffwandlung, also mit der Veränderung von Stoffeigenschaften. Damit Stoffwandlungsprozesse stattfinden können, muß man den Stoffsystemen Energie zuführen. Der Stoffwandlungsprozeß kann dabei eine chemische Reaktion sein, bei der Wärme verbraucht oder frei wird. Es kann sich aber auch um eine Trennung von Komponenten durch Wärmezufuhr handeln, wie wir sie beispielsweise von der Rektifikation kennen. Aber auch eine Stoffwandlung durch Zuführen mechanischer Energie ist möglich, wie beim Zerkleinern von Feststoffen. Alle verfahrenstechnischen Apparate und die meisten verfahrenstechnischen Maschinen sind dadurch gekennzeichnet, daß sich in ihnen mehrphasige Stoffsysteme befinden, die sich aus Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen zusammensetzen. Dabei handelt es sich meistens um zwei- oder dreiphasige Systeme.

Belagbildung an den Wänden der Apparate oder Maschinen hat ganz unterschiedliche Ursachen. Sind beispielsweise in einer Gasströmung Feststoffpartikel enthalten, so kann es zu Feststoffansätzen an den Apparatewänden kommen. Abb. 1 zeigt Ansatzbildung in einem Zyklonabscheider, der zum Abtrennen sehr feiner Feststoffpartikel aus einem Gasstrom eingesetzt wurde. Schuld an den Ansätzen sind Haftkräfte zwischen den feinen Partikeln und der Wand, die so groß sind, daß sie von den Strömungskräften nicht überwunden werden können.

Ein anderes Beispiel: In Braunschweig sind wir in der glücklichen Lage, Wasser aus dem Harz zu haben, das praktisch keine Härtebildner – z.B. Calciumcarbonat oder Calciumsulfat – enthält. Aber in vielen anderen Landstrichen kennt man das Problem, daß sich in Wassertöpfen Kalkbeläge bilden, Wasserleitungen durch Kalkbelag zuwachsen, Heizstäbe von Waschmaschinen und Geschirrspülern durch Kalkablagerungen zerstört werden. Welche Querschnittsveränderungen durch Ablagerungen in Wasserleitungen auftreten können, verdeutlicht Abb. 2.

Aber auch im menschlichen Körper kann eine unerwünschte Belagbildung auftreten. Abb. 3 gibt einen Eindruck von der Gefäßverengung bei Arteriosklerose.

Als ein Beispiel soll hier die Belagbildung durch Auskristallisieren von Feststoffen bei Unterschreiten der Löslichkeit infolge Temperaturänderung in der Flüssigkeit behandelt werden. Abb. 4 zeigt den Temperaturverlauf durch eine feste Wand in eine

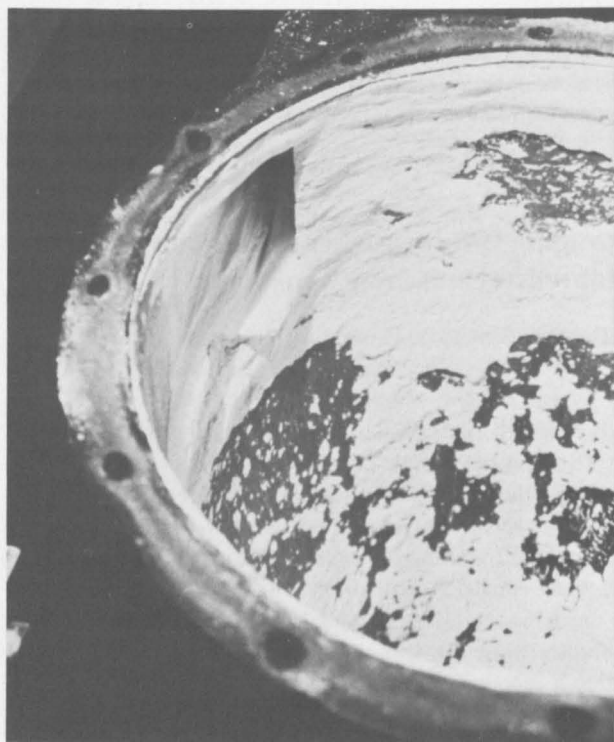


Abb. 1:
Feststoffablagerungen
in einem Zyklonabscheider

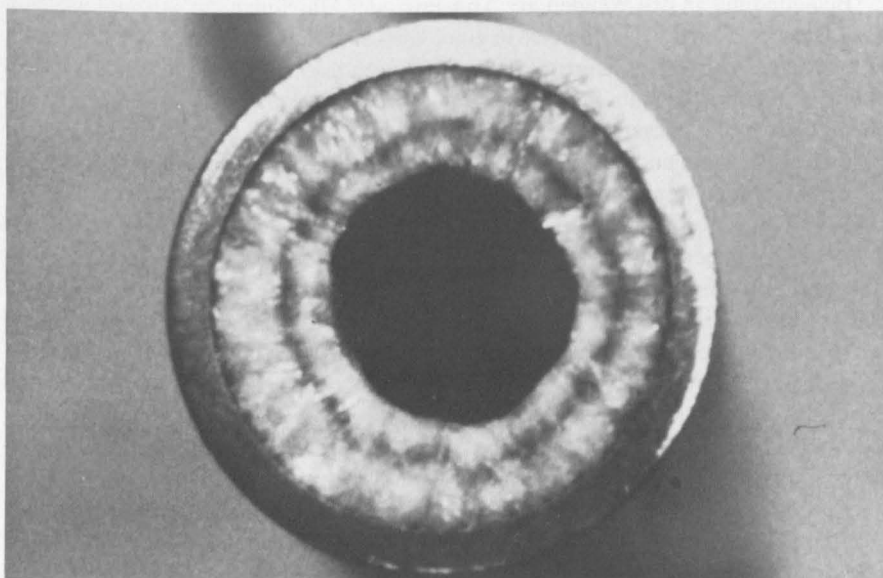


Abb. 2:
Belagbildung durch
Härtebildner in einem
Wasserleitungsrohr

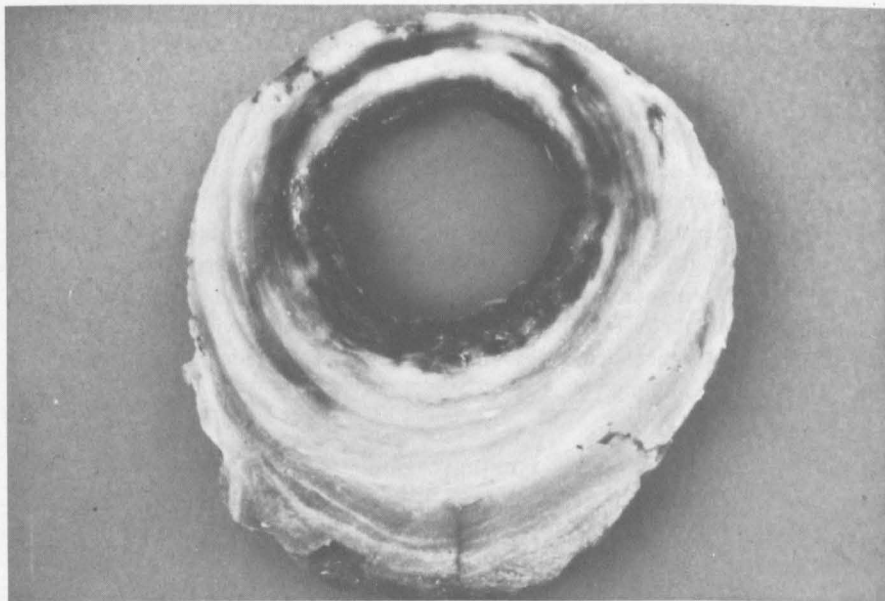


Abb. 3:

Gefäßverengung bei Arteriosklerose. (Die Abbildung wurde freundlicherweise von Herrn Prof. Dr. Gerhard Seifert, Institut für Pathologie der Universität Hamburg, zur Verfügung gestellt.)

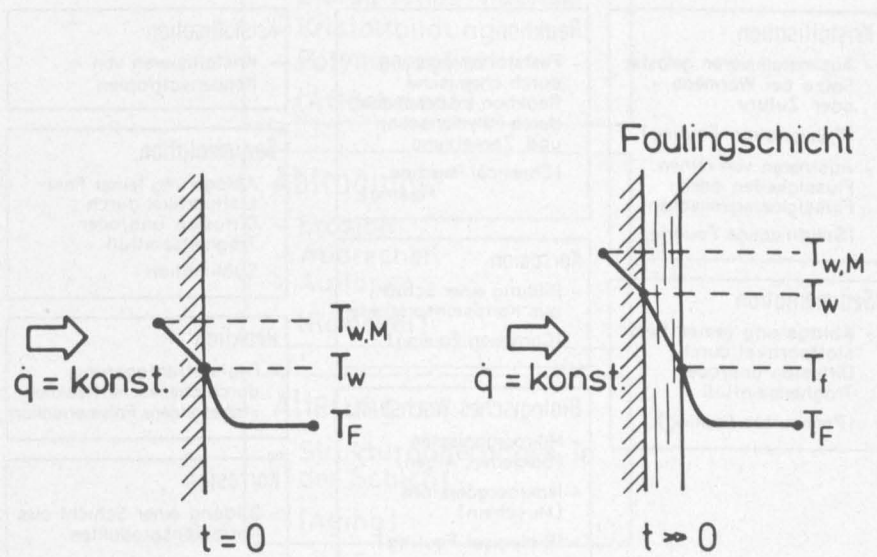


Abb. 4:

Temperaturverlauf bei sauberer (links) und verschmutzter (rechts) Wärmeaustauscherfläche

strömende Flüssigkeit. Durch die Wärmeaustauscherwand soll ein bestimmter Wärmestrom übertragen werden. Man beobachtet, daß in der Wand ein Temperaturabfall eintritt, der sich in der Grenzschicht der Flüssigkeitsströmung fortsetzt. Im turbulenten Strömungskern stellt sich eine konstante Flüssigkeitstemperatur ein. Beginnt nun auf einer Seite dieser wärmeaustauschenden Wand eine Belagbildung – häufig auch als Fouling bezeichnet – so hat dies Konsequenzen. Kann auf der Flüssigkeitsseite nur eine bestimmte Wärmemenge abtransportiert werden, so entspricht die Temperatur an der Oberfläche der sogenannten Foulingschicht genau der Temperatur an der sauberen Wärmeübertragungsfläche. Innerhalb der Foulingschicht steigt wegen ihrer schlechten Leitfähigkeit die Temperatur stark an und ist an der Wärmeaustauscherfläche deutlich höher als bei sauberer Wärmeübertragungsfläche. Dies führt in vielen Fällen zu Überhitzung und damit zu Schäden. Das Durchbrennen von Heizstäben ist häufig die Folge einer solchen Belagbildung.

Foulingvorgang

Beim Fouling unterscheidet man verschiedene Mechanismen, die in Abb.5 beschrieben sind. Die Abbildung gibt die wichtigsten Einflüsse wieder, erhebt aber keinen

FOULING - MECHANISMEN

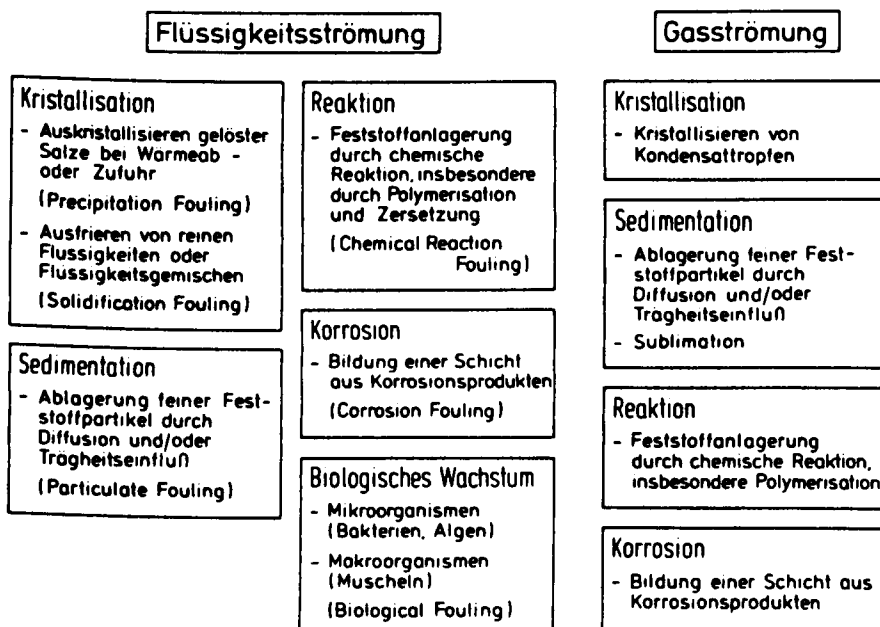


Abb. 5:
Verschiedene Mechanismen beim Fouling

FOULING-PHASEN

Einleitung

- Induktion
- Keimbildung
- Oberflächenveränderung
(Initiation)

Transport

- Diffusion
- Sedimentation
(Transport)

Ablagerung

- Haften
- Kleben/Sintern
- Biologisches Wachsen
- Kristallbildung
- Polymerisation
(Attachment)

Abtragung

- Erosion
- Abbrechen
- Auflösen
(Removal)

Alterung

- Strukturänderungen in
der Schicht
(Aging)

Abb. 6:
Die fünf wichtigsten Phasen des Foulings

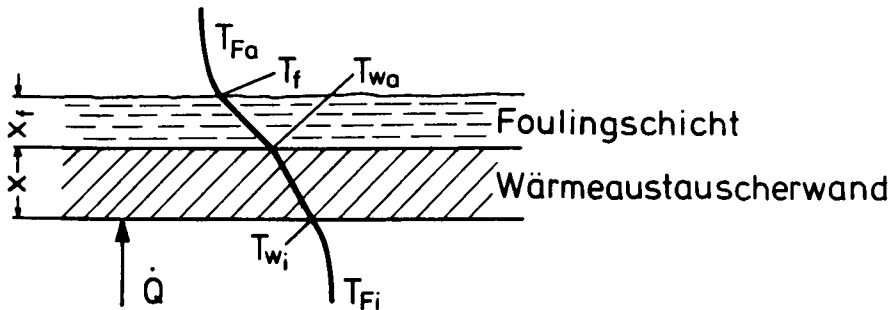


Abb. 7:

Temperaturverlauf in einer verschmutzten Wärmeaustauscherwand

Anspruch auf Vollständigkeit. In diesem Beitrag wird nur das Fouling aus Flüssigkeitsströmungen behandelt und dabei auch nur die Kristallisation. Die Hinweise auf die anderen Foulingmechanismen und auch der Hinweis auf die Gasströmung soll deutlich machen, daß es eine Vielzahl von Problemen gibt. Das Fouling selbst läuft in verschiedenen Phasen ab. Die fünf wichtigsten sind in Abb. 6 dargestellt.

Abb. 7 zeigt eine verschmutzte Wärmeübertragungsfläche. Ist diese eben, so gilt für den übertragenen Wärmestrom:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= A \cdot \alpha_i (T_{Fi} - T_{wi}) = A \frac{\lambda}{x} (T_{wi} - T_{wa}) = A \frac{\lambda_f}{x_f} (T_{wa} - T_f) = A \alpha_a (T_f - T_{Fa}) \\ &= A \cdot k_f (T_{Fi} - T_{Fa}).\end{aligned}\quad (1)$$

Aus Gl. (1) folgt definitionsgemäß für den Wärmedurchgangswiderstand der sauberen Fläche:

$$\frac{1}{k_0} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (2)$$

und für den Wärmedurchgangswiderstand der verschmutzten Fläche:

$$\frac{1}{k_f} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{x}{\lambda} + \frac{x_f}{\lambda_f} + \frac{1}{\alpha_a}. \quad (3)$$

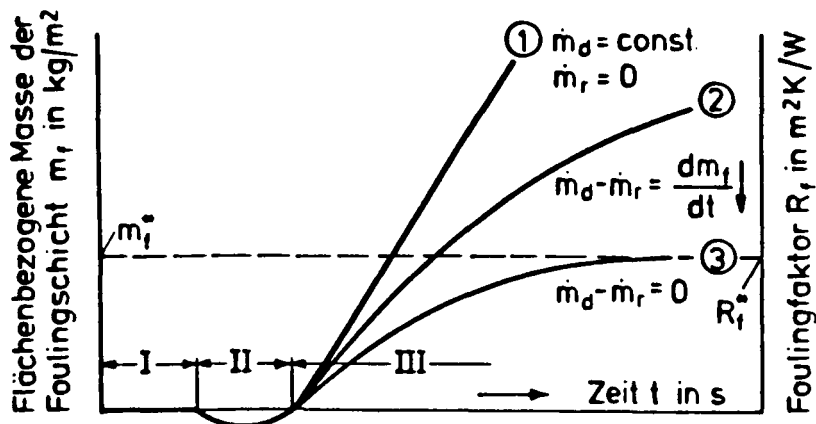
Der sogenannte Foulingfaktor ergibt sich damit zu:

$$R_f = \frac{1}{k_f} - \frac{1}{k_0} = \frac{x_f}{\lambda_f}. \quad (4)$$

Für den pro Flächeneinheit in der Foulingschicht abgelagerten Feststoff findet man unter Beachtung von Gl. (4):

$$m_f = q_f \cdot x_f = q_f \lambda_f R_f. \quad (5)$$

In der überwiegenden Zahl der Fälle wird der Ablagerungsvorgang von einem Abtragungsvorgang begleitet. Für den Feststoffzuwachs der Foulingschicht gilt dann:



I Induktion

II Übergang

III Fouling

① Zuwachs ist konstant

② Zuwachs nimmt mit der Zeit ab

③ Zuwachs nimmt mit der Zeit ab
und geht gegen NullAbb. 8:
Foulingkurven

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_r, \quad (6)$$

wobei in Anlehnung an das angelsächsische Schrifttum der Index d (deposit) für Ablagerung und der Index r (removal) für Abtragung benutzt wird.

Abb. 8 zeigt unterschiedliche Foulingkurven, wobei sich 3 Fälle unterscheiden lassen:

- linearer Zuwachs der flächenbezogenen Masse der Foulingsschicht und damit auch des Foulingfaktors mit der Zeit. Es findet kein Feststoffabtrag statt (Kurve 1),
- Verlangsamung des Feststoffzuwachses mit zunehmender Schichtdicke, ohne daß die Foulingkurve einem Endwert zustrebt (Kurve 2),
- der pro Zeit- und Flächeneinheit abgetragene Feststoff entspricht nach einer gewissen Zeit dem abgelagerten Feststoff. Die flächenbezogene Masse der Foulingsschicht und damit auch der Foulingfaktor erreichen Grenzwerte (m_f^* bzw. R_f^*) (Kurve 3).

Bezüglich des zeitlichen Ablaufs des Foulingvorgangs sind unterschiedliche Fälle zu beobachten. Definiert man 3 Zeitabschnitte, die mit

I Induktion

II Übergang

III Fouling

bezeichnet werden, so ist zunächst zu beachten, daß die Zeitabschnitte I und/oder II auftreten können, aber nicht auftreten müssen.

Der in Abb. 8 im Übergangsbereich II eingezeichnete Kurvenverlauf mit negativen Werten für den Foulingfaktor kennzeichnet eine Verbesserung des Wärmedurchgangs gegenüber der sauberen Fläche. Diese kann beispielsweise durch eine Rauigkeits-erhöhung bei beginnender Feststoffablagerung bedingt sein. Technisch ist dieser Bereich bedeutungslos.

Physikalische Beschreibung des Foulingvorgangs

Beim Fouling durch Kristallisation findet eine Verkrustung der Wärmeaustauscherfläche statt. An der Phasengrenze Flüssigkeit/Foulingschicht herrscht, wie Abb. 9 zeigt, Übersättigung. Zwischen Kristall und Lösung befindet sich eine Strömungsgrenzschicht, durch die der Stofftransport durch Diffusion erfolgt.

Hierfür gilt:

$$\left(\frac{dm_f}{dt}\right)_d = \beta(c_F - c_f). \quad (7)$$

Der Einbau der Gitterbausteine erfolgt in Form einer Grenzflächenreaktion, für die gilt [1]:

$$\left(\frac{dm_f}{dt}\right) = k_R(c_f - c_s)^n. \quad (8)$$

n bezeichnet die Reaktionsordnung, die für technisch wichtige Fälle zwischen 1 und 2 liegt. Eliminiert man die experimentell nur schwer bestimmbare Konzentration c_f an

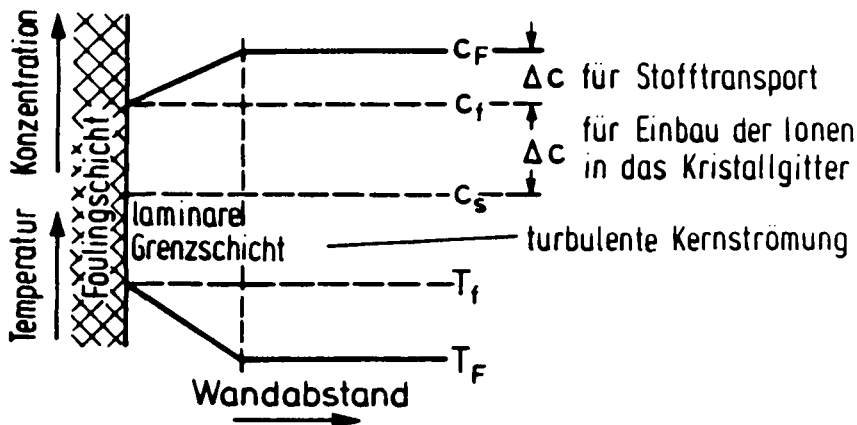


Abb. 9:
Konzentrations- und Temperaturverlauf in der Nähe der Foulingschicht
(Fouling durch Kristallisation)

der Phasengrenzfläche, so folgt aus den Gl. (7) und (8) für die zeitliche Änderung der Feststoffmasse der Foulingschicht bei Ablagerung:

$$\left[\frac{1}{k_R} \left(\frac{dm_f}{dt} \right)_d \right]^{1/n} + \frac{1}{\beta} \left(\frac{dm_f}{dt} \right)_d - (c_F - c_s) = 0. \quad (9)$$

Ist die Einbaureaktion von 1. Ordnung, so wird:

$$\left(\frac{dm_f}{dt} \right)_d = \dot{m}_d = \frac{1}{\frac{1}{k_R} + \frac{1}{\beta}} (c_F - c_s). \quad (10)$$

Für eine Einbaureaktion 2. Ordnung ergibt sich:

$$\left(\frac{dm_f}{dt} \right)_d = \dot{m}_d = \beta \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{k_R} \right) + (c_F - c_s) - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\beta}{k_R} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{k_R} \right) (c_F - c_s)} \right\}. \quad (11)$$

Hierbei ist zu beachten, daß die Dimension der Geschwindigkeitskonstante k_R von der Reaktionsordnung abhängt.

Die Beziehungen (10) und (11) sagen ein unbegrenztes Wachstum der Foulingschicht voraus. Unter technischen Bedingungen ist jedoch davon auszugehen, daß die aus Kristallen gebildete Foulingschicht sehr inhomogen ist. Solche Inhomogenitäten können beispielsweise durch Fremdkörpereinschluß bedingt sein. Darüber hinaus können infolge Temperaturabfalls in der Foulingschicht Wärmespannungen auftreten, die zu einer Festigkeitsverminderung in der Schicht führen. Für die Scherfestigkeit der Schicht, die ja beim Abtrag von der an der Schichtoberfläche angreifenden Schubspannung überwunden werden muß, wird folgender Ansatz gemacht:

$$\sigma_f = K_1 \frac{P}{N x_f (1 + \delta \Delta T) d_p}. \quad (12)$$

ΔT bezeichnet hierüber den Temperaturabfall in der Foulingschicht, δ den linearen Ausdehnungskoeffizienten und d_p den Kristalldurchmesser. P beschreibt die interkristallinen Haftkräfte und N die Anzahl der Fehlstellen in der Foulingschicht. Für den Feststoffabtrag aus der Schicht soll dann gelten:

$$\left(\frac{dm_f}{dt} \right)_r = K_2 \frac{\tau_f}{\sigma_f} Q_f \left(\frac{\eta g}{\varrho} \right)^{1/3}. \quad (13)$$

Diese Beziehung sagt aus, daß die Abtragung proportional der an der Foulingschicht angreifenden Schubspannung und umgekehrt proportional der Scherfestigkeit der Foulingschicht ist. Für die an der Oberfläche der Foulingschicht angreifende Schubspannung wird gesetzt:

$$\tau_f \sim \varrho w^2, \quad (14)$$

womit folgt:

$$\left(\frac{dm_f}{dt}\right)_r = \dot{m}_r = \frac{K_3}{P} \varrho_f (1 + \delta \Delta T) d_p (\varrho^2 \eta g)^{1/3} x_f w^2, \quad (15)$$

wobei die Anzahl der Fehlstellen N in die Konstante K_3 übernommen wurde.

Für den Fall, daß eine Einbaureaktion 1. Ordnung vorliegt, läßt sich mit den Gl. (10) und (15) der Zuwachs an Feststoff in der Foulingschicht berechnen.

Mit

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_r \quad (16)$$

und Einführen des Foulingfaktors entsprechend Gl. (4) folgt:

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{c_F - c_s}{\varrho_f \lambda_f \left(\frac{1}{k_R} + \frac{1}{\beta} \right)} - \frac{K_3}{P} (1 + \delta \Delta T) d_p (\varrho^2 \eta g)^{1/3} w^2 R_f. \quad (17)$$

Die Integration dieser Beziehung liefert unter Berücksichtigung der Randbedingung, daß bei $t = 0$ auch $R_f = 0$ sein muß:

$$R_f = \frac{(c_F - c_s) P}{\varrho_f \lambda_f \left(\frac{1}{k_R} + \frac{1}{\beta} \right) K_3 (1 + \sigma \Delta T) d_p (\varrho^2 \eta g)^{1/3} w^2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{K_3}{P} (1 + \delta \Delta T) d_p (\varrho^2 \eta g)^{1/3} w^2 t} \right\}. \quad (18)$$

Für den asymptotischen Endwert des Foulingfaktors bei $t \rightarrow \infty$ folgt:

$$R_f^* = \frac{(c_F - c_s) P}{\varrho_f \lambda_f \left(\frac{1}{k_R} + \frac{1}{\beta} \right) K_3 (1 + \sigma \Delta T) d_p (\varrho^2 \eta g)^{1/3} w^2}. \quad (19)$$

Für die zeitliche Zunahme des Foulingfaktors bis zum Erreichen des asymptotischen Endwertes erhält man:

$$\frac{R_f}{R_f^*} = 1 - e^{-\frac{K_3}{P} (1 + \delta \Delta T) d_p (\varrho^2 \eta g)^{1/3} w^2 t}. \quad (20)$$

Aus Gl. (20) folgt als wichtige Erkenntnis, daß der Endwert des Foulingfaktors um so schneller erreicht wird, je größer

- die Strömungsgeschwindigkeit
- die Kristallgröße
- der lineare Ausdehnungskoeffizient
- der Temperaturabfall in der Schicht ist und
- je kleiner die interkristallinen Haftkräfte sind.

Es sei darauf verwiesen, daß entsprechende Beziehungen zur Bestimmung des Foulingfaktors bei Einbaureaktionen 2. Ordnung und bei Feststoffsedimentation aus Flüssigkeiten von BOHNET [2] und KRAUSE [3] veröffentlicht wurden.

Experimentelle Untersuchungen

Kernstück der Versuchsanlage des Instituts für Verfahrens- und Kerntechnik der Technischen Universität Braunschweig sind zwei Meßstrecken, die als Doppelrohr ausgebildet sind. Die Wärmeaustauscherflächen der beiden Meßstrecken werden elektrisch beheizt, so daß sie bei konstanter Heizleistung betrieben werden können. Die Heizleistung bleibt auch dann konstant, wenn der Wärmedurchgang infolge Fouling schlechter wird. Das Schema der Versuchsanlage ist in Abb. 10 dargestellt. Die eigentliche Meßstrecke zeigt Abb. 11. Sie besteht aus einem elektrischen Hochleistungsheizstab, der aus 3 Mantelheizleitern mit Durchmessern von 2,3 mm besteht, die auf einen

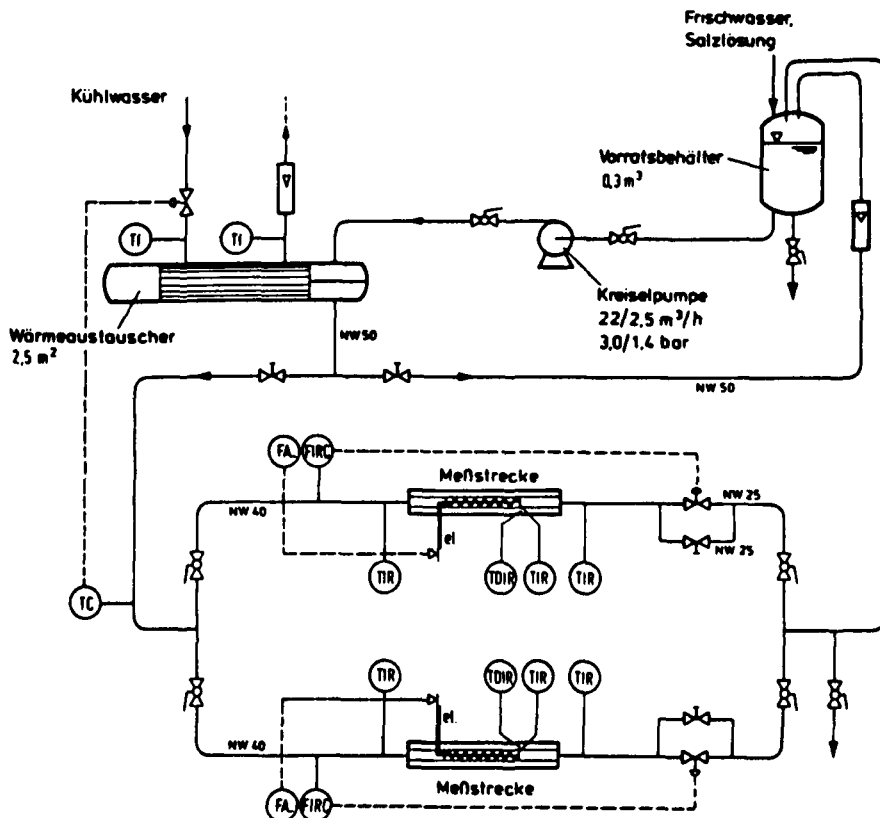


Abb. 10:
Versuchsanlage zur Untersuchung der Verkrustung und Verschmutzung
von Wärmeaustauscherflächen bei Flüssigkeitsströmungen

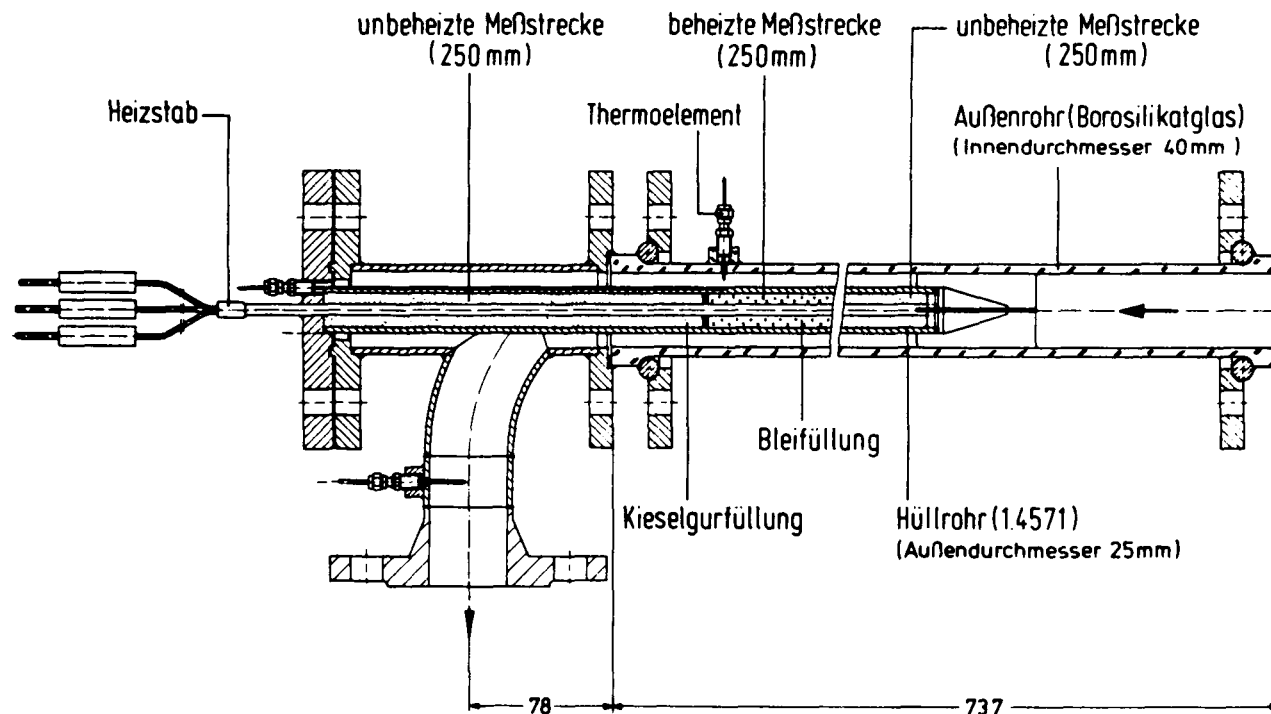


Abb. II:
Meßstrecke der Versuchsanlage

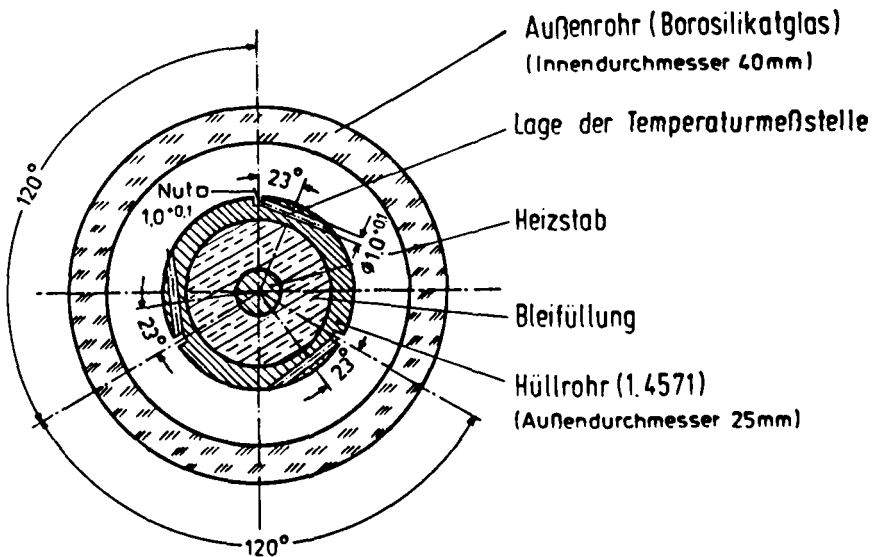


Abb. 12:
Anordnung der Thermoelemente an der Heizrohrroboberfläche

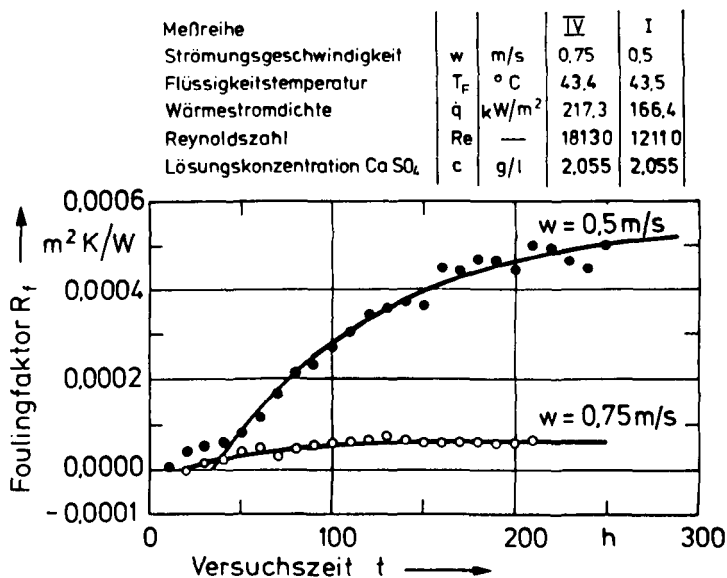


Abb. 13:
Foulingkurven für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten

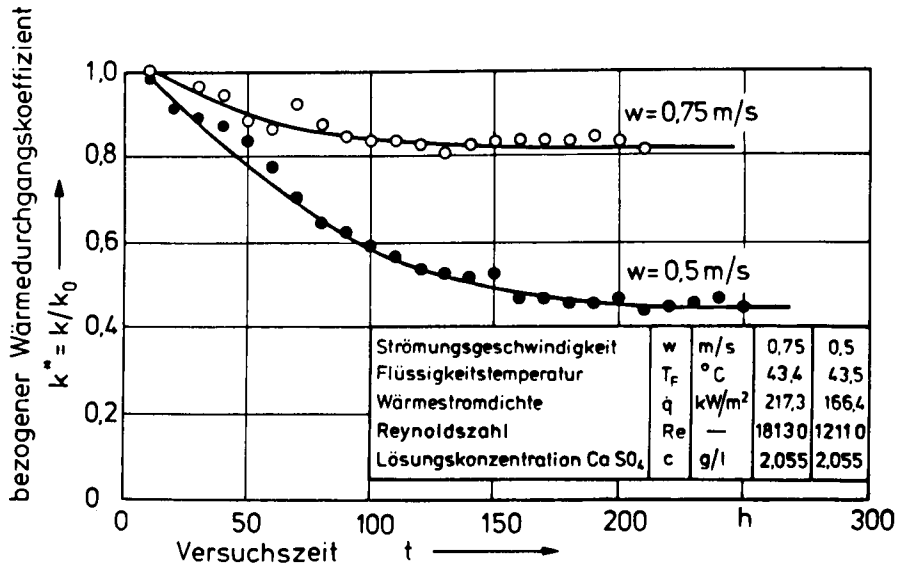


Abb. 14:

Abnahme des Wärmedurchgangskoeffizienten mit der Zeit bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten (Meßpunkte entsprechend Abb. 13)

Kupferkern gewickelt und von außen mit einem geschmiedeten Stahlmantel aus einer NiCr-Legierung umschlossen sind. Die maximale Heizleistung beträgt 8 kW. Der Hochleistungsheizstab selbst ist in ein Hüllrohr aus nichtrostendem Stahl mit einem Außendurchmesser von 25 mm zentriert eingebaut. Zur Messung der Oberflächentemperaturen sind, wie Abb. 12 zeigt, Mantelthermoelemente mit 1 mm Durchmesser in 1,1 mm breite Nuten eingelegt. Die Thermolemente sind am Ende der beheizten Strecke in tangentielle Bohrungen von 1,1 mm Durchmesser eingelötet.

Bei den Kristallisationsversuchen wurde zunächst der Wärmedurchgangswiderstand bei sauberer Wärmeaustauscherfläche bestimmt. Danach wurde die Anlage mit wäßrigen CaSO₄-Lösungen betrieben, wobei die Lösung immer Sättigungskonzentration hatte. Beispielhaft zeigt Abb. 13 gemessene Foulingkurven für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten. Um den starken Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf das Foulingverhalten deutlich zu machen, wurde in Abb. 14 für diese Meßreihen der bezogene Wärmedurchgangskoeffizient k_f/k_0 in Abhängigkeit von der Versuchszeit t aufgetragen.

Der Ausgleich der Meßwerte erfolgte mit statistischen Methoden. Die Foulingkurven wurden dabei durch eine Gleichung der Form

$$R_f = R_f^* \left(1 - e^{-\frac{t-t_A}{\theta}} \right) \quad (21)$$

beschrieben und die Parameter R_f^* , t_A und θ mit Hilfe nicht linearer Regression bestimmt.

Vergleich berechneter mit gemessenen Endwerten des Foulingfaktors

Um zu prüfen, inwieweit Gl. 19 gemessene asymptotische Endwerte des Foulingfaktors schreibt wurden berechnete Werte von R_f^* mit gemessenen verglichen. Über die Porosität der CaSO_4 -Krusten läßt sich die Dichte der Krustenschicht und die Wärmeleitfähigkeit berechnen. Die mittlere Kristallgröße in der Foulingschicht wurde mikroskopisch bestimmt, der lineare Ausdehnungskoeffizient aus Literaturangaben abgeschätzt. Für die Bestimmung des Stoffübergangskoeffizienten β und der Geschwindigkeitskonstanten der Reaktion k_R wurden Beziehungen aus der Literatur verwandt. Die einzige Größe, über die es keinerlei Aussagen gibt, ist die interkristalline Haftkraft P . Faßt man die Haftkraft P und die Konstante K_3 aus Gl. 19 zu einem Haftfaktor zusammen, so läßt sich dieser Haftfaktor in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit aus den experimentellen Ergebnissen bestimmen. Abb. 15 zeigt einen Vergleich berechneter Endwerte R_f^* des Foulingfaktors mit gemessenen Werten. Berücksichtigt man die Komplexität des Foulingvorgangs und die Tatsache, daß sicherlich noch nicht alle Einflußgrößen in die Überlegungen einbezogen werden konnten, so ist die Übereinstimmung des experimentell gefundenen Sachverhalts mit den theoretischen Ansätzen recht zufriedenstellend.

Abb. 16 zeigt eine Krustenschicht an der Wärmeaustauscherfläche unserer Versuchsanlage. In Abb. 17, die eine REM-Aufnahme einer Calciumsulfatkrustenschicht zeigt, sind die nadelförmigen Sulfatkristalle deutlich zu erkennen. Sieht man sich den Quer-

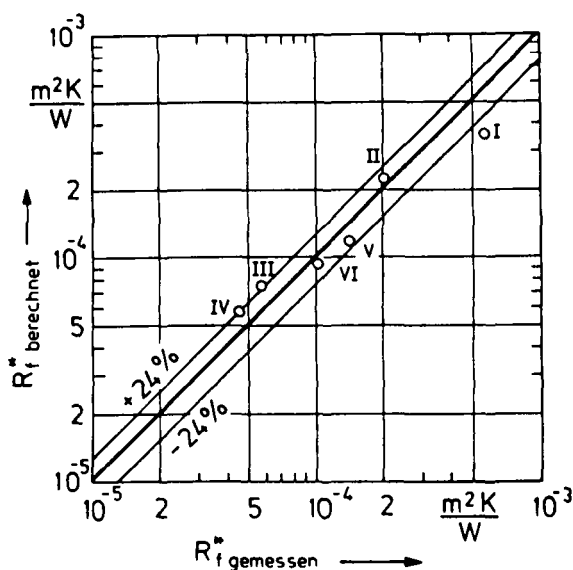


Abb. 15:
Vergleich gemessener mit berechneten Endwerten des Foulingfaktors



Abb. 16:
Krustenschicht am Wärmeaustauscherrohr

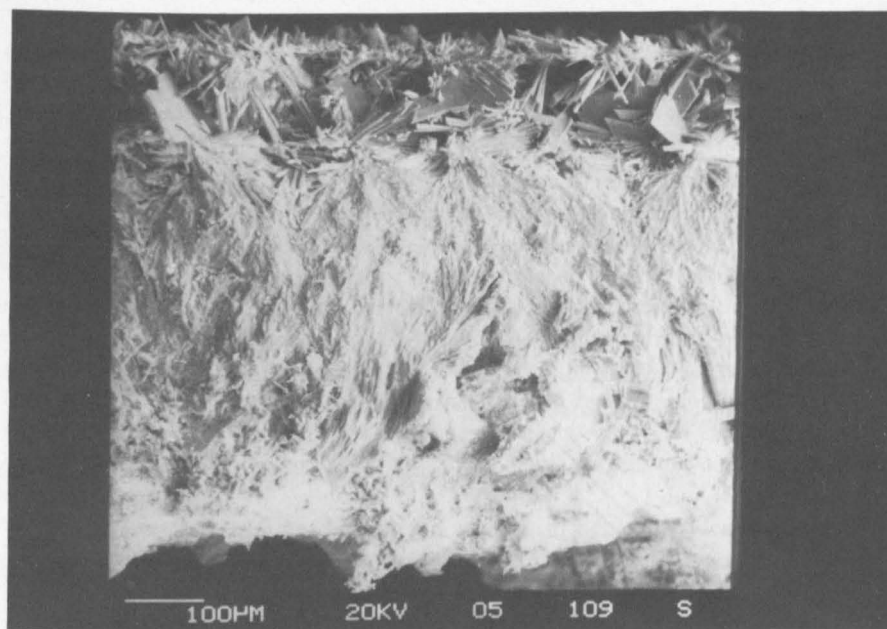


Abb. 17:
REM-Aufnahme einer Krustenschicht

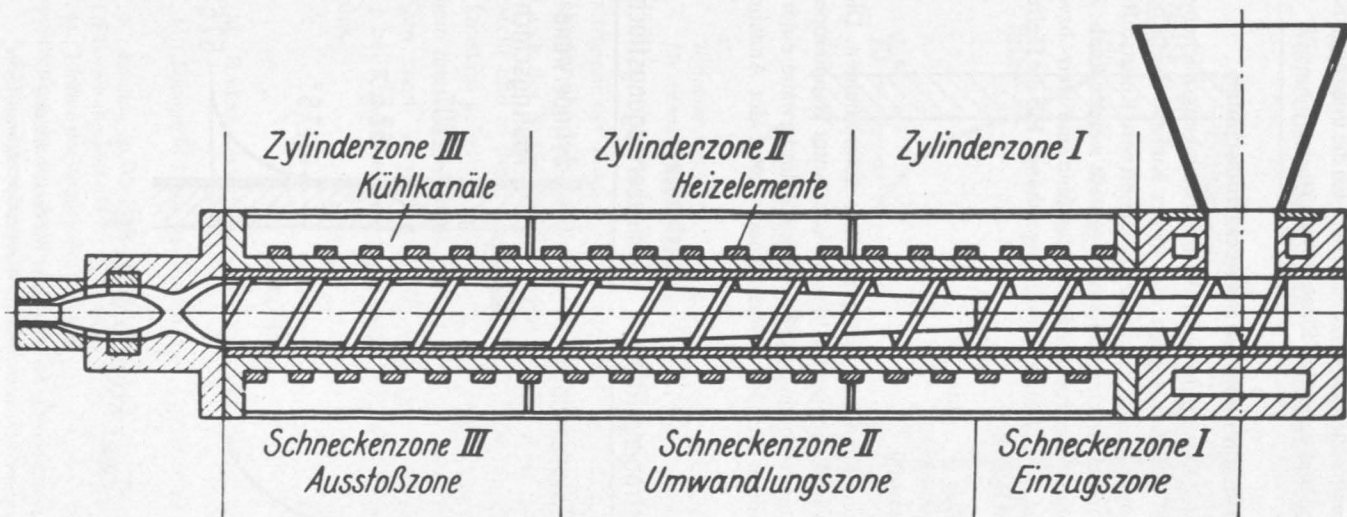


Abb. 18:
Heiz- und Kühlzonen einer Schneckenmaschine

schnitt einer solchen Kruste näher an, so fällt auf, daß sich die unteren Kristallschichten offensichtlich verfestigen und dabei ihre Struktur ändern.

Wärmeübergang bei Schneckenmaschinen

Die Auswirkungen der Belagbildung auf Wärmeübertragungsflächen soll abschließend an einem Beispiel erläutert werden, das in der Kunststoffverarbeitung große Bedeutung hat [4]. In sogenannten Schneckenmaschinen wird Kunststoffgranulat aufgeschmolzen, damit es in entsprechende Formen gepreßt werden kann. Abb. 18 zeigt das Schema einer Einschneckenpresse. An der Maschine sind Heiz- bzw. Kühlzonen angeordnet, deren Länge von der Aufgabenstellung abhängt. Für die Heizung kommen verschiedene Systeme in Betracht:

1. Dampfheizung
2. Flüssigkeitsheizung
3. Elektrische Heizung.

Je nach Beheizungssystem kann man zwei Grenzfälle unterscheiden. Die Beheizung erfolgt bei konstanter Wärmestromdichte bzw. bei konstanter Wandtemperatur.

Die Auswirkungen einer Foulingschicht auf der Zylinderwand einer Schneckenpresse lassen sich an einem Beispiel verdeutlichen. Unter der Annahme, daß der

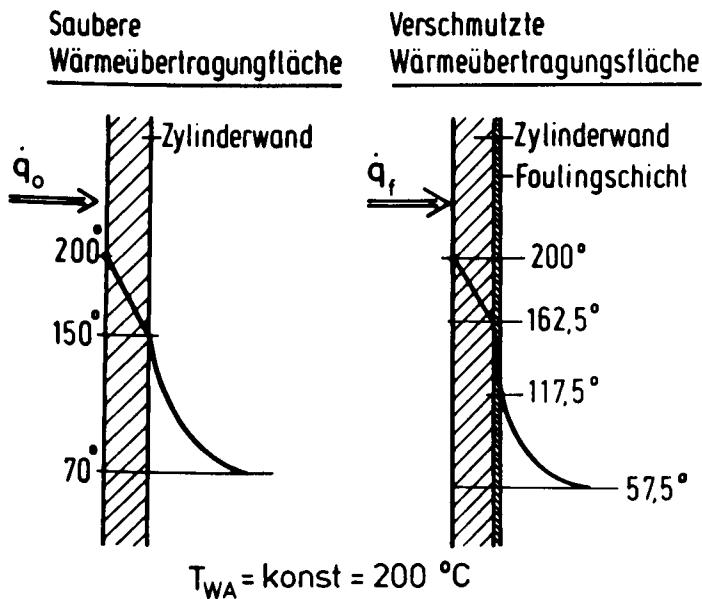


Abb. 19:
Temperaturprofile bei konstanter Wärmestromdichte
für die saubere bzw. verschmutzte Wärmeübertragungsfläche

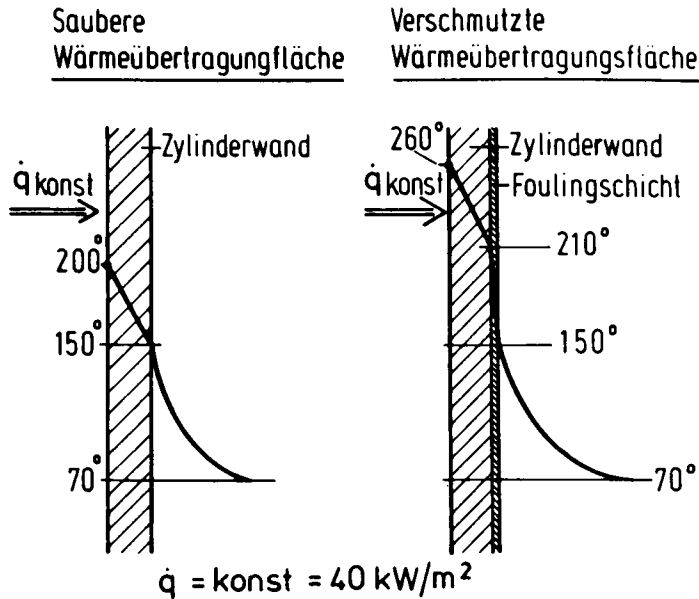


Abb. 20:

Temperaturprofile bei konstanter Temperatur der Außenwand für die saubere bzw. verschmutzte Wärmeübertragungsfläche

Wärmeleitkoeffizient der Foulingschicht um den Faktor 100 kleiner ist, als der des Zylinderwerkstoffs und die Spaltbreite zwischen Schnecke und Zylinder 0,3 mm beträgt, läßt sich der Temperaturverlauf berechnen. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengestellt und in den Abb. 19 und 20 grafisch dargestellt. Wird die Wärmestromdichte konstant gehalten, so führt die Verschmutzung der Wärmeübertragungsfläche zu einem deutlichen Temperaturanstieg in der Wand, der zur Zerstörung der Heizung führen kann. Wird Wärme bei konstanter Wandtemperatur übertragen, beispielsweise bei Kondensation von Dampf, so geht der übertragbare Wärmestrom drastisch zurück.

Schrifttum

- [1] BOHNET, M.: Fouling von Wärmeübertragungsflächen. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 57 (1985) 1, S. 24/36.
- [2] BOHNET, M.: Fouling of Heat Transfer Surfaces. Chem.-Eng. Technol. Bd. 10 (1987) 12, S. 113/125.
- [3] KRAUSE, S.: Fouling an Wärmeübertragungsflächen durch Kristallisation und Sedimentbildung. VDI-Forschungsheft 637/86, VDI-Verlag, Düsseldorf 1986.
- [4] BOHNET, M.: Einfluß der Belagbildung an Wärmeübertragungsflächen auf den Wärmeübergang. Wärmeübertragung bei der Kunststoffaufbereitung. VDI-Verlag, Düsseldorf 1986, S. 55/72.